

ВДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДВООПОРНИХ НЕОРІЄНТОВАНИХ КОМПОНОВОК НИЗУ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

I. I. Чудик

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 727137,
e-mail: chudoman@ukr.net

Розглядаються важливі питання підвищення техніко-економічних показників буріння нафтових і газових свердловин за рахунок вдосконалення технічних засобів і науково-методичних основ їх проектування і вибору. Охарактеризовано вплив конструктивних параметрів неорієнтованих компоновок низу бурильної колони з двома опорно-центрувальними елементами на статичні характеристики її взаємодії з вибоєм та стінками свердловини. Проаналізовано світовий досвід вирішення питань проектування, вибору і експлуатації неорієнтованих компоновок низу бурильної колони з двома опорно-центрувальними елементами. Визначено основні підходи і методики, які використовуються при проектуванні неорієнтованих компоновок низу бурильної колони з двома центраторами і критерії, що є визначальними при їх виборі для різних задач спрямованого буріння. Досліджено процес впливу на статичні характеристики взаємодії елементів неорієнтованої компоновки низу бурильної колони вала шпинделя вибійного двигуна. За результатами аналітичних досліджень на прикладі двоопорних конструкцій компоновок встановлено, що врахування в аналітичній схемі взаємодії нижньої частини бурильної колони з вибоєм і стінками свердловини різних за розмірами елементів компоновки, незалежно від їх довжини, ваги і жорсткості на згин, впливає на статичні характеристики їх взаємодії із стінками свердловини, а саме: на відхиляючу силу на долоті, кут його повороту і сили притискування центрувальних елементів до стінок свердловини.

Ключові слова: бурильна колона, проектування, сила, вісь, опір, свердловина

Рассматриваются важные вопросы повышения технико-экономических показателей бурения скважин за счет совершенствования технических средств и научно-методических основ их проектирования и выбора. Охарактеризованы влияние конструктивных параметров неориентированных компоновок низа бурильной колонны с двумя опорно-центрировочными элементами на статические характеристики ее взаимодействия с забоем и стенками скважины. Проанализированы мировой опыт решения вопросов проектирования, выбора и эксплуатации неориентированных компоновок низа бурильной колонны с двумя опорно-центрировочными элементами. Определены основные подходы и методики, используемые при проектировании неориентированных компоновок низа бурильной колонны с двумя центраторами и критерии, которые являются определяющими при их выборе для различных задач направленного бурения. Исследован процесс влияния на статические характеристики взаимодействия элементов неориентированной компоновки низа бурильной колонны вала шпинделя забойного двигателя. По результатам аналитических исследований на примере двухопорной конструкции компоновок установлено, что учет в аналитической схеме взаимодействия нижней части бурильной колонны с забоем и стенками скважины различных по размерам элементов компоновки, независимо от их длины, веса и жесткости на изгиб, влияет на статические характеристики их взаимодействия с стенками скважины, а именно: на отклоняющую силу на долоте, угол его поворота и силы прижима центрирующих элементов к стенкам скважины.

Ключевые слова: бурильная колонна, проектирование, сила, ось, сопротивление, скважина

The article deals with the important issues of increasing technical and economic parameters of drilling oil and gas wells by improving facilities and scientific and methodological bases of their design and choice. The influence of structural parameters of undirected bottom hole assembly with two supporting and centering elements onto the static characteristics of its interaction with the well bottom and walls has been characterized. International experience of resolving such issues as design, selection and operation of undirected bottom hole assembly with two supporting and centering elements has been analyzed. The main approaches and techniques used for designing of undirected bottom hole assembly with two centralizers and criteria that are essential for their selection for different directional drilling tasks have been determined. The process of bottom hole drive shaft influence onto the static characteristics of the undirected bottom hole assembly elements interaction has been studied. The results of analytical studies on the example of two-support undirected bottom hole assembly have shown that taking into account the bottom hole assembly interaction with well bottom and walls of different bottom hole assembly element sizes, regardless their length, weight and bending stiffness in the analytical scheme affects the static characteristics of their interaction with the walls of the well, namely the bit deflection force, its rotation angle and centering elements pressing force to the walls of the well.

Key words: drill string, designing, force, axis, resistance, well

Вступ. Сучасні темпи економічного, науково-технічного та соціального розвитку людства зумовили різке підвищення попиту на нафту й газ і збільшили об'єми їх споживання. Першочергово освоювалися ті родовища, на яких в найкоротші терміни розгорталися бурові роботи і розпочиналося видобування вуглевод-

нів із продуктивних покладів з максимальною віддачею. Це поступово призвело до зростання кількості розроблених і вичерпаних родовищ. З часом їх кількість збільшилася та зросли глибини залягання нафти і газу. Необхідність розгортання бурових робіт постала в рекреаційних зонах, морських акваторіях, зонах континента-

льного шельфу, на родовищах скупчення покладів вугільного і сланцевого газу. При цьому основним шляхом вирішення проблем, пов'язаних із їх розробкою, залишилося буріння похило-скерованих свердловин. При бурінні ПСС найбільш відповідальним етапом із циклу її будівництва є дотримання заданої траєкторії. Воно забезпечується використанням спеціальних технічних засобів – неорієнтованих компонок низу бурильної колони (КНБК).

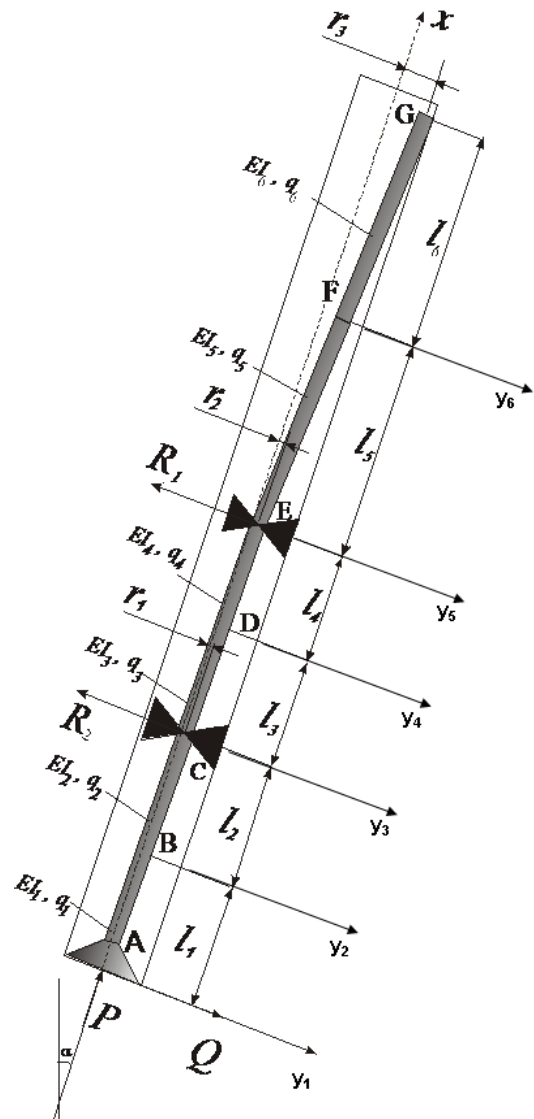
Аналіз стану проблеми. В практиці буріння ПСС широкого розповсюдження набули неорієнтовані КНБК з двома опорно-центруючими елементами (ОЦЕ). Їх використовують для управління зенітним кутом та стабілізації азимута стовбура таких свердловин. При цьому, від них вимагається велика ефективність і надійність в роботі, що залежить, насамперед, від конструктивних параметрів елементів компоновки. Тому для досягнення того чи іншого результату при бурінні ПСС слід підбирати компоновку, враховуючи реальну її конструкцію. В роботах [1-4 і ін.], які присвячені розрахунку неорієнтованих КНБК їх математичні моделі, є спрощеними і узагальненими. Тому є необхідність розробки математичної моделі розрахунку КНБК з врахуванням їх деталізованої конструкції і умов роботи в стовбурі свердловини. Це дозволить здійснювати правильний вибір діаметрів центраторів і місця їх встановлення для вирішення тієї чи іншої задачі. Тому проблема вдосконалення методу проектування неорієнтованих КНБК є актуальною і потребує подальшого розвитку.

Для реалізації цієї актуальної задачі ставиться *мета роботи*, яка полягає у підвищенні ефективності буріння свердловин шляхом вдосконалення методики проектування двоопорних неорієнтованих КНБК. При цьому *об'єктом дослідження* є неорієнтована двоопорна КНБК, а *предметом дослідження* – статичні характеристики взаємодії її елементів з вибоєм та стінками свердловини. *Методи дослідження* призначені для реалізації поставленої мети дослідження є теорія пружності, математичне моделювання і програмування.

Реалізація поставленої мети. Розглянемо неорієнтовану двоопорну КНБК, яка розташована в похило-спрямованому стовбурі свердловини, (рис. 1). Її розрахункова схема складається із шести ділянок різної ваги погонного метра та жорсткості на згин, на межі контакту 2 – і 3 – і 4 – і 5 – і яких установлено центратори. Крива $ABCDEF$ представляє собою пружну вісь компоновки, де точка A відповідає долоту, B , D і F – точкам спряження ділянок різної жорсткості, C і E – місця встановлення центраторів і G – верхній точці дотику КНБК зі стінкою свердловини.

Окрім того, приймається, що:

- стінки свердловини не деформуються і є прямолінійними;
- центр долота і стовбура свердловини знаходяться в одній точці;



q_i – вага погонного метра ділянок КНБК;
 EI_i – жорсткість на згин ділянок КНБК;
 Q – відхиляюча сила на долоті;
 P – осьова сила на долоті;
 R_i – реакції на ОЦЕ;

r_1, r_2 – радіальні зазори між ОЦЕ і стінками свердловини;

r_3 – радіальний зазор між елементами КНБК і стінками свердловини в верхній точці контакту низу бурильної колони зі стовбуром свердловини

Рисунок 1 – Розрахункова схема неорієнтованої КНБК із двома ОЦЕ

• відцентрові сили відсутні за рахунок невеликих швидкостей обертання бурильної колони при роторному способі буріння; їх відсутність спостерігається у разі використання вибійних двигунів;

• згин колони відбувається в одній площині (за рахунок неперпендикулярності свердловини); у місцях контакту КНБК зі стінкою свердловини відсутні сили тертя;

• ОЦЕ не зношуються і розглядаються як точкові опори.

$$r_1 = r_2 = \frac{D_D - D_{OP}}{2}; \quad (1)$$

$$r_3 = \frac{D_D - D_G}{2}, \quad (2)$$

де D_D – діаметр долота;

D_{OP} – діаметр опори (центратора чи каліб-
ратора);

D_G – зовнішній діаметр елемента КНБК у
точці G ;

α – зенітний кут нахилу осі свердловини.

Аналітичне дослідження сил, що вплива-
ють на викривлення свердловини у випадку
використання ступінчастих двоопорних КНБК
за рахунок великих значень зенітного кута,
зводиться до розрахунку плоскої задачі мето-
дом диференціальних рівнянь. Згідно наведеної
розрахункової схеми (рис. 1), отримуємо такі
диференціальні рівняння.

Для ділянки АВ:

$$EI_1 \frac{d^2 y_1}{dx_1^2} = -P y_1(x_1) + Q x_1 + \frac{q_1 x_1^2 \sin(\alpha)}{2}. \quad (3)$$

Для ділянки ВС:

$$EI_2 \frac{d^2 y_2}{dx_2^2} = -[P - q_1 l_1 \cos(\alpha)] y_2(x_2) + Q(l_1 + x_2) + \left(\frac{q_1 l_1^2}{2} + q_1 l_1 x_2 + \frac{q_2 x_2^2}{2} \right) \sin(\alpha). \quad (4)$$

Для ділянки CD:

$$EI_3 \frac{d^2 y_3}{dx_3^2} = -\left[P - \sum_{i=1}^2 q_i l_i \cos(\alpha) \right] y_3(x_3) + Q \left(\sum_{i=1}^2 l_i + x_3 \right) - R_2 x_3 + \left(\sum_{i=1}^2 \frac{q_i l_i^2}{2} + x_3 \sum_{i=1}^2 q_i l_i + q_1 l_1 l_2 + \frac{q_3 x_3^2}{2} \right) \sin(\alpha). \quad (5)$$

Для ділянки DE:

$$EI_4 \frac{d^2 y_4}{dx_4^2} = -\left[P - \sum_{i=1}^3 q_i l_i \cos(\alpha) \right] y_4(x_4) + Q \left(\sum_{i=1}^3 l_i + x_4 \right) - R_2(l_3 + x_4) + \left(\sum_{i=1}^3 \frac{q_i l_i^2}{2} + x_4 \sum_{i=1}^3 q_i l_i + q_1 l_1 \sum_{i=2}^3 l_i + q_2 l_2 l_3 + \frac{q_4 x_4^2}{2} \right) \sin(\alpha). \quad (6)$$

Для ділянки DE:

$$EI_5 \frac{d^2 y_5}{dx_5^2} = -\left[P - \sum_{i=1}^4 q_i l_i \cos(\alpha) \right] y_5(x_5) + Q \left(x_5 + \sum_{i=1}^4 l_i \right) - R_1 x_5 - R_2 \left(x_5 + \sum_{i=3}^4 l_i \right) + \left(\sum_{i=1}^4 \frac{q_i l_i^2}{2} + l_3 \sum_{i=1}^2 q_i l_i + l_4 \sum_{i=1}^3 q_i l_i + x_5 \sum_{i=1}^4 q_i l_i + q_1 l_1 l_2 + \frac{q_5 x_5^2}{2} \right) \sin(\alpha); \quad (8)$$

Для ділянки FG:

$$EI_6 \frac{d^2 y_6}{dx_6^2} = -\left[P - \sum_{i=1}^5 q_i l_i \cos(\alpha) \right] y_6(x_6) + Q \left(x_6 + \sum_{i=1}^5 l_i \right) - R_1(x_6 + l_5) - R_2 \left(x_6 + \sum_{i=3}^5 l_i \right) + \left(\sum_{i=1}^5 \frac{q_i l_i^2}{2} + l_3 \sum_{i=1}^2 q_i l_i + l_4 \sum_{i=1}^3 q_i l_i + x_6 \sum_{i=1}^5 q_i l_i + l_5 \sum_{i=1}^4 q_i l_i + q_1 l_1 l_2 + \frac{q_6 x_6^2}{2} \right) \sin(\alpha). \quad (9)$$

Двічі проінтегрувавши диференціальні рів-
няння (3)–(9), отримуємо функції зміни вели-
чини прогинів осі КНБК відносно осі свердло-
вини на всіх шести відповідних ділянках:

$$y_1(x) = A_1 \sin(k_1 x_1) + A_2 \cos(k_1 x_1) + \frac{Q x_1}{P} + \left(\frac{q_1 x_1^2}{2P} - \frac{q_1}{k_1^2 P} \right) \sin(\alpha); \quad (10)$$

$$y_2(x) = B_1 \sin(k_2 x_2) + B_2 \cos(k_2 x_2) + \frac{Q(x_2 + l_1)}{P - q_1 l_1 \cos(\alpha)} + \frac{\frac{q_2 x_2^2}{2} + \frac{q_1 l_1^2}{2} + q_1 l_1 x_2 - \frac{q_2}{k_2^2}}{P - q_1 l_1 \cos(\alpha)} \sin(\alpha); \quad (11)$$

$$y_3(x) = C_1 \sin(k_3 x_3) + C_2 \cos(k_3 x_3) + \left\{ Q \left(x_3 + \sum_{i=1}^2 l_i \right) - R_2 x_3 + \left[\sum_{i=1}^2 \frac{q_i l_i^2}{2} + x_3 \sum_{i=1}^2 q_i l_i + \frac{q_3 x_3^2}{2} + q_1 l_1 l_2 - \frac{q_3}{k_3^2} \right] \sin(\alpha) \right\} \times \left\{ P - \sum_{i=1}^2 q_i l_i \cos(\alpha) \right\}^{-1}; \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
y_4(x_4) = & D_1 \sin(k_4 x_4) + D_2 \cos(k_4 x_4) + \\
& \frac{Q(x_4 + \sum_{i=1}^3 l_i) - R_2(x_4 + l_3)}{P - \sum_{i=1}^3 q_i l_i \cos(\alpha)} + \\
& + \left\{ \sum_{i=1}^3 \frac{q_i l_i^2}{2} + q_1 l_1 \sum_{i=2}^3 l_i + x_4 \sum_{i=1}^3 q_i l_i + \right. \\
& \left. + q_2 l_2 l_3 + \frac{q_4 x_4^2}{2} - \frac{q_4}{k_4^2} \right\} \times \\
& \times \left\{ P - \sum_{i=1}^3 q_i l_i \cos(\alpha) \right\}^{-1} \times \sin(\alpha); \quad (13)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_5(x_5) = & E_1 \sin(k_5 x_5) + E_2 \cos(k_5 x_5) + \\
& \frac{Q(x_5 + \sum_{i=1}^4 l_i) - R_1 x_5 - R_2(x_5 + \sum_{i=3}^4 l_i)}{P - \sum_{i=1}^4 q_i l_i \cos(\alpha)} + \\
& + \left\{ \sum_{i=1}^4 \frac{q_i l_i^2}{2} + q_1 l_1 l_2 + l_3 \sum_{i=1}^2 q_i l_i + \right. \\
& \left. + l_4 \sum_{i=1}^3 q_i l_i + x_5 \sum_{i=1}^4 q_i l_i + \frac{q_5 x_5^2}{2} - \frac{q_5}{k_5^2} \right\} \times \\
& \times \left\{ P - \sum_{i=1}^4 q_i l_i \cos(\alpha) \right\}^{-1} \times \sin(\alpha); \quad (14)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_6(x_6) = & F_1 \sin(k_6 x_6) + F_2 \cos(k_6 x_6) + \\
& \frac{Q(x_6 + \sum_{i=1}^5 l_i) - R_1(x_6 + l_5)}{P - \sum_{i=1}^5 q_i l_i \cos(\alpha)} + \\
& + \frac{-R_2(x_6 + \sum_{i=3}^5 l_i) + (\sum_{i=1}^5 \frac{q_i l_i^2}{2} + l_3 \sum_{i=1}^2 q_i l_i + l_4 \sum_{i=1}^3 q_i l_i) \sin(\alpha)}{P - \sum_{i=1}^5 q_i l_i \cos(\alpha)} + \\
& + \frac{(l_5 \sum_{i=1}^4 q_i l_i + x_6 \sum_{i=1}^5 q_i l_i + q_1 l_1 l_2 + \frac{q_6 x_6^2}{2} - \frac{q_6}{k_6^2}) \sin(\alpha)}{P - \sum_{i=1}^5 q_i l_i \cos(\alpha)}. \quad (15)
\end{aligned}$$

Функції, що описують зміну величин кутів повороту осі КНБК відносно осі свердловини для кожної з її ділянок, відповідно записуються:

$$\begin{aligned}
y_1^I(x_1) = & A_1 k_1 \cos(k_1 x_1) - A_2 k_1 \sin(k_1 x_1) + \\
& + \frac{Q}{P} + \frac{q_1 x_1}{P} \sin(\alpha); \quad (16)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_2^I(x_2) = & B_1 k_2 \cos(k_2 x_2) - B_2 k_2 \sin(k_2 x_2) + \\
& + \frac{Q + (q_1 l_1 + q_2 x_2) \sin(\alpha)}{P - q_1 l_1 \cos(\alpha)}; \quad (17)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_3^I(x_3) = & C_1 k_3 \cos(k_3 x_3) - C_2 k_3 \sin(k_3 x_3) + \\
& + \frac{Q - R_2 + (\sum_{i=1}^2 q_i l_i + q_3 x_3) \sin(\alpha)}{P - \sum_{i=1}^2 q_i l_i \cos(\alpha)}; \quad (18)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_4^I(x_4) = & D_1 k_4 \cos(k_4 x_4) - D_2 k_4 \sin(k_4 x_4) + \\
& + \frac{Q - R_2 + (\sum_{i=1}^3 q_i l_i + q_4 x_4) \sin(\alpha)}{P - \sum_{i=1}^3 q_i l_i \cos(\alpha)}; \quad (19)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_5^I(x_5) = & E_1 k_5 \cos(k_5 x_5) - E_2 k_5 \sin(k_5 x_5) + \\
& + \frac{Q - R_1 - R_2 + (\sum_{i=1}^4 q_i l_i + q_5 x_5) \sin(\alpha)}{P - \sum_{i=1}^4 q_i l_i \cos(\alpha)}; \quad (20)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_6^I(x_6) = & F_1 k_6 \cos(k_6 x_6) - F_2 k_6 \sin(k_6 x_6) + \\
& + \frac{Q - R_1 - R_2 + (\sum_{i=1}^5 q_i l_i + q_6 x_6) \sin(\alpha)}{P - \sum_{i=1}^5 q_i l_i \cos(\alpha)}. \quad (21)
\end{aligned}$$

Функції, що описують зміну величин згинальних моментів по осі КНБК, для кожної з її ділянок записуються так:

$$\begin{aligned}
M_1(x_1) = & \left[-A_1 k_1^2 \sin(k_1 x_1) - A_2 k_1^2 \cos(k_1 x_1) + \right. \\
& \left. + \frac{q_1}{P} \sin(\alpha) \right] EI_1; \quad (22)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_2(x_2) = & \left[-B_1 k_2^2 \sin(k_2 x_2) - B_2 k_2^2 \cos(k_2 x_2) + \right. \\
& \left. + \frac{q_2 \sin(\alpha)}{P - q_1 l_1 \cos(\alpha)} \right] EI_2; \quad (23)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_3(x_3) = & \left[-C_1 k_3^2 \sin(k_3 x_3) - C_2 k_3^2 \cos(k_3 x_3) + \right. \\
& \left. + \frac{q_3 \sin(\alpha)}{P - \sum_{i=1}^2 q_i l_i \cos(\alpha)} \right] EI_3; \quad (24)
\end{aligned}$$

$$M_4(x_4) = \left[-D_1 k_4^2 \sin(k_4 x_4) - D_2 k_4^2 \cos(k_4 x_4) + \frac{q_4 \sin(\alpha)}{P - \sum_{i=1}^3 q_i l_i \cos(\alpha)} \right] EI_4 ; \quad (25)$$

$$M_5(x_5) = \left[-E_1 k_5^2 \cos(k_5 x_5) - E_2 k_5^2 \sin(k_5 x_5) + \frac{q_5 \sin(\alpha)}{P - \sum_{i=1}^4 q_i l_i \cos(\alpha)} \right] EI_5 ; \quad (26)$$

$$M_6(x_6) = \left[-F_1 k_6^2 \cos(k_6 x_6) - F_2 k_6^2 \sin(k_6 x_6) + \frac{q_6 \sin(\alpha)}{P - \sum_{i=1}^5 q_i l_i \cos(\alpha)} \right] EI_6 , \quad (27)$$

де $A_i, B_i, C_i, D_i, E_i, F_i$ – сталі інтегрування;
 k_i – коефіцієнти, які залежать від осьової сили на долоті та жорсткості на згин елементів КНБК [5].

Взаємодія неорієнтованих двоопорних КНБК із вибоєм та стінками свердловини характеризується такими граничними умовами:

при $x_1=0$ $y_1(0)=0$;
 при $x_1=l_1$ і $x_2=0$ $y_1(l_1)=y_2(0)$ та $y_1'(l_1)=y_2'(0)$;
 при $x_2=l_2$ і $x_3=0$ $y_2(l_2)=r_1$, $y_3(0)=r_1$ та $y_2'(l_2)=y_3'(0)$;
 при $x_3=l_3$ і $x_4=0$ $y_3(l_3)=y_4(0)$ та $y_3'(l_3)=y_4'(0)$;
 при $x_4=l_4$ і $x_5=0$: $y_4(l_4)=r_2$, $y_5(0)=r_2$ та $y_4'(l_4)=y_5'(0)$;
 при $x_5=l_5$ і $x_6=0$ $y_5(l_5)=y_6(0)$ та $y_5'(l_5)=y_6'(0)$;
 при $x_6=l_6$ $y_6(l_6)=r_3$, $y_6'(l_6)=0$, $y_6(l_6)=0$.

Згідно з граничними умовами:

r_1, r_2 – радіальні зазори між 1-ою та 2-ою опорами і стінками свердловини (1);

r_3 – радіальний зазор між елементом КНБК і стінкою свердловини в точці G (2).

Вихідними даними для розв'язання системи рівнянь є:

- діаметри долота та ОЦЕ;
- зенітний кут нахилу осі свердловини;
- осьова сила на долоті (осьове навантаження);
- довжини, вага погонного метра і жорсткості на згин кожної з ділянок низу бурової колони.

Розв'язком даної задачі є значення невідомих величин, основними з яких є: Q, R_1, R_2, l_6 та постійні інтегрування $A_i, B_i, C_i, D_i, E_i, F_i$. Отримані значення дають можливість обчислити також значення прогинів та кутів повороту пружної осі КНБК по відношенню до осі свердловини.

Одним із основних питань, яке цікавило автора досліджень, є виявлення впливу на силові параметри взаємодії елементів неорієнтованих двоопорних компоновок з вибоєм та стін-

ками свердловини окремих невеликих ділянок (вал шпинделя вибійного двигуна), які не враховувалися в роботах [1-4].

За результатами проведених аналітичних і експериментальних [6] досліджень за наведеним підходом відхиляючої сили на долоті для КНБК з двома ОЦЕ було встановлено (рис. 2), що наявність вала шпинделя вибійного двигуна теж впливає на Q . При відстані між опорами 6 – 14 м вдосконалення аналітичної схеми дослідження КНБК зумовлює збільшення відхиляючої сили на долоті на 9 %. Зростання довжини компоновки за рахунок зміни місця розташування верхнього ОЦЕ зменшує вплив вала шпинделя вибійного двигуна на Q до 2 % і вказує на недоцільність врахування ділянок малої довжини при розрахунку КНБК із двома опорами.

Подальші дослідження довели, що для КНБК з двома ОЦЕ врахування в її математичній моделі вала шпинделя вибійного двигуна також вносить зміни в значення реакцій на нижній (рис. 3) та верхній опорах (рис.3), зокрема при збільшенні віддалі ними. Як бачимо, реакція на ОЦЕ за наявності в КНБК вала шпинделя вибійного двигуна, визначена на основі розв'язку диференціальних рівнянь, є меншою від результатів експерименту [6] на величину 5 %, а без вала – більшою на 9 %. З цього випливає, що наявність вала шпинделя вибійного двигуна не так суттєво впливає на зміну величини R , як на відхиляючу силу на долоті.

На верхньому ОЦЕ сила R його взаємодії із стінкою свердловини відрізняється від результатів експериментальних досліджень [6] з максимальною величиною різниці 13 %. Причому наявність вала шпинделя вибійного двигуна практично не впливає на її зміну.

Як бачимо за мінімальної відстані між центрувальними пристроями, при якій відбувається взаємодія нижнього ОЦЕ із стінками свердловини, результати аналітичних досліджень практично збігаються між собою і з експериментальними даними [6]. При збільшенні відстані між ОЦЕ різниця зростає і є максимальною в момент дотику компоновки із нижньою стінкою свердловини.

Максимальне значення цієї реакції на верхньому ОЦЕ відповідає моменту, коли КНБК між центраторами прогинається і лягає на нижню стінку свердловини. Така тенденція до зміни реакції на верхньому ОЦЕ є характерною і для одноопорних КНБК. Сила спочатку спадає, і при деякій відстані між ОЦЕ вона стає мінімальною, а потім далі зростає і стає максимальною за рахунок збільшення довжини КНБК тоді, коли між центрувальними пристроями появляється ще одна точка контакту за рахунок провисання.

Величина відхиляючої сили на долоті не є єдиним критерієм оцінки тенденції викривлення стовбура свердловини при бурінні неорієнтованими КНБК. Значною мірою на викривлення стовбура впливає кут повороту долота [3]. Для оцінки ефективності впливу наявності вала шпинделя вибійного двигуна в аналітичній

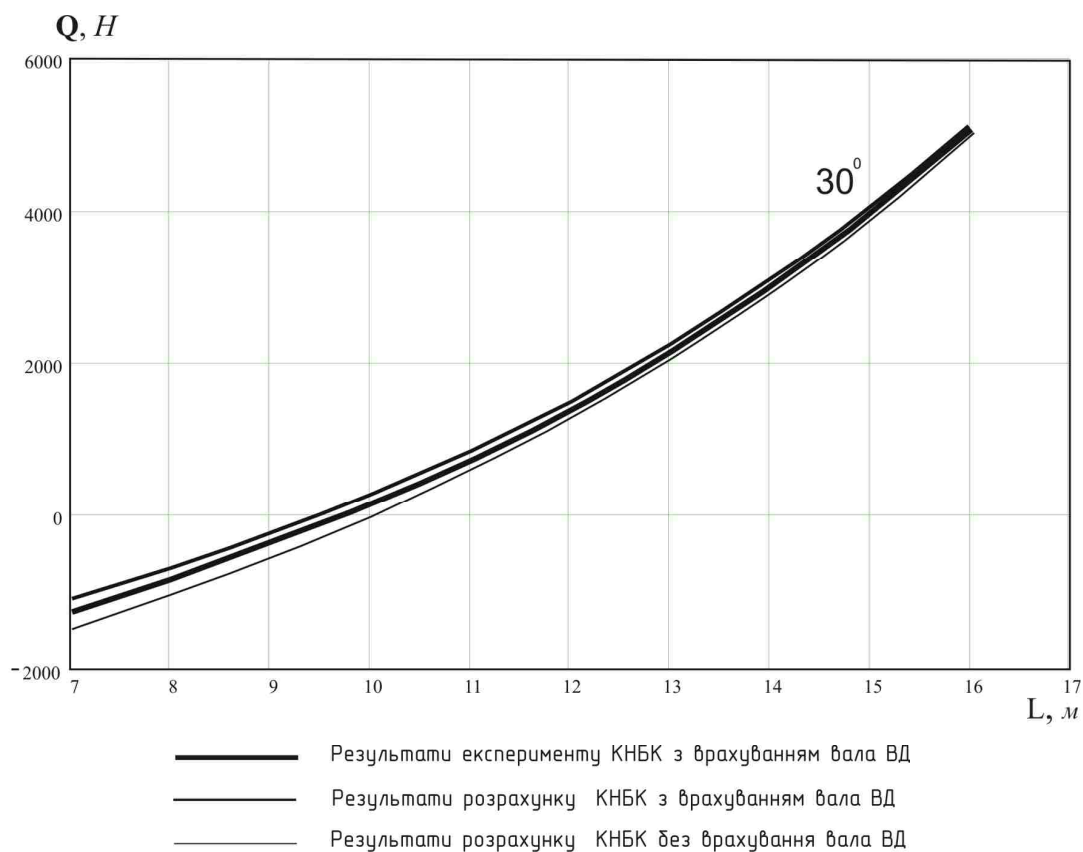


Рисунок 2 – Залежність зміни відхиляючої сили на долоті від відстані між долотом та ОЦЕ для двоопорної КНБК

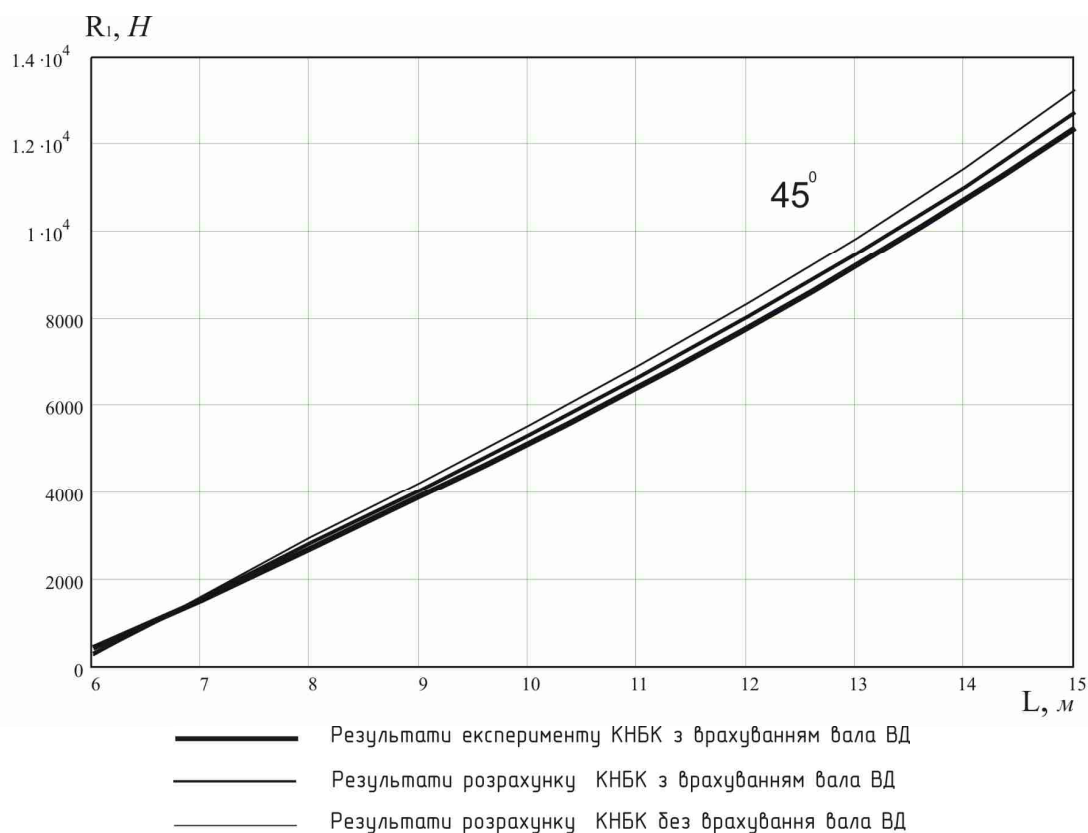


Рисунок 3 – Зміна реакції на нижньому ОЦЕ для двоопорної КНБК

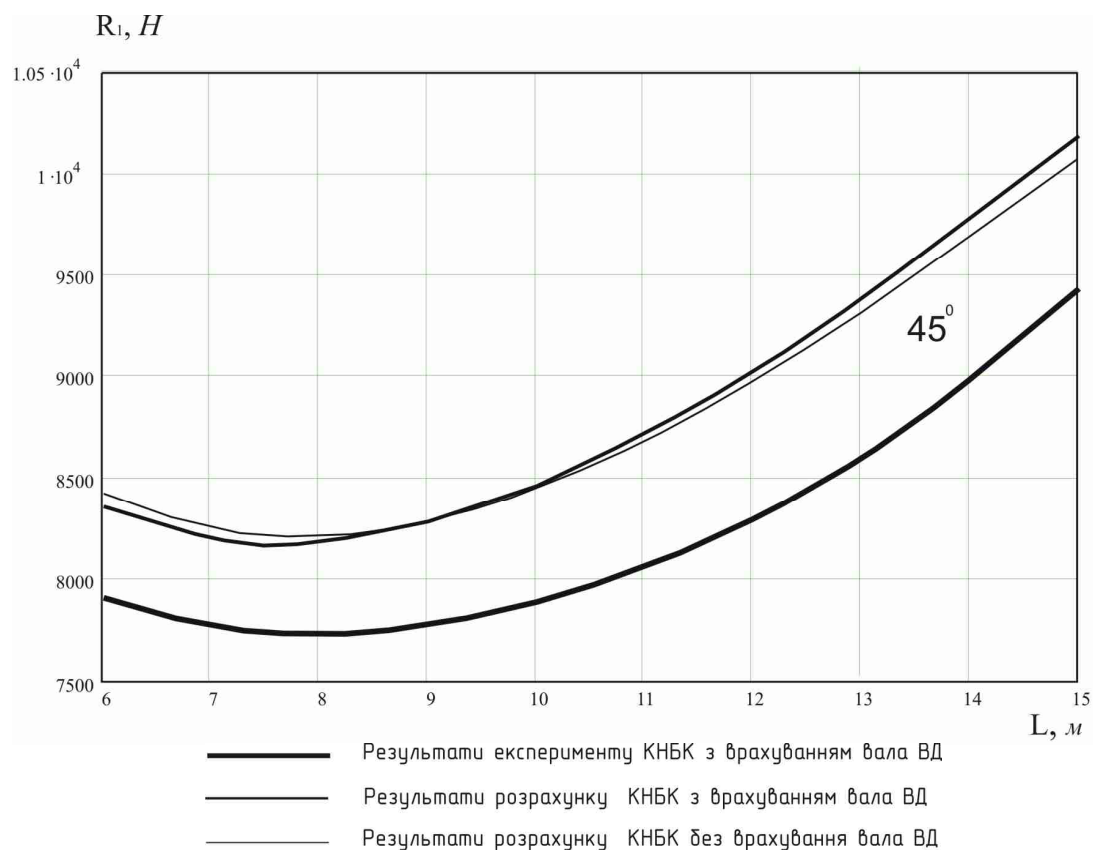


Рисунок 4 – Зміна реакції на верхньому ОЦЕ для двоопорної КНБК

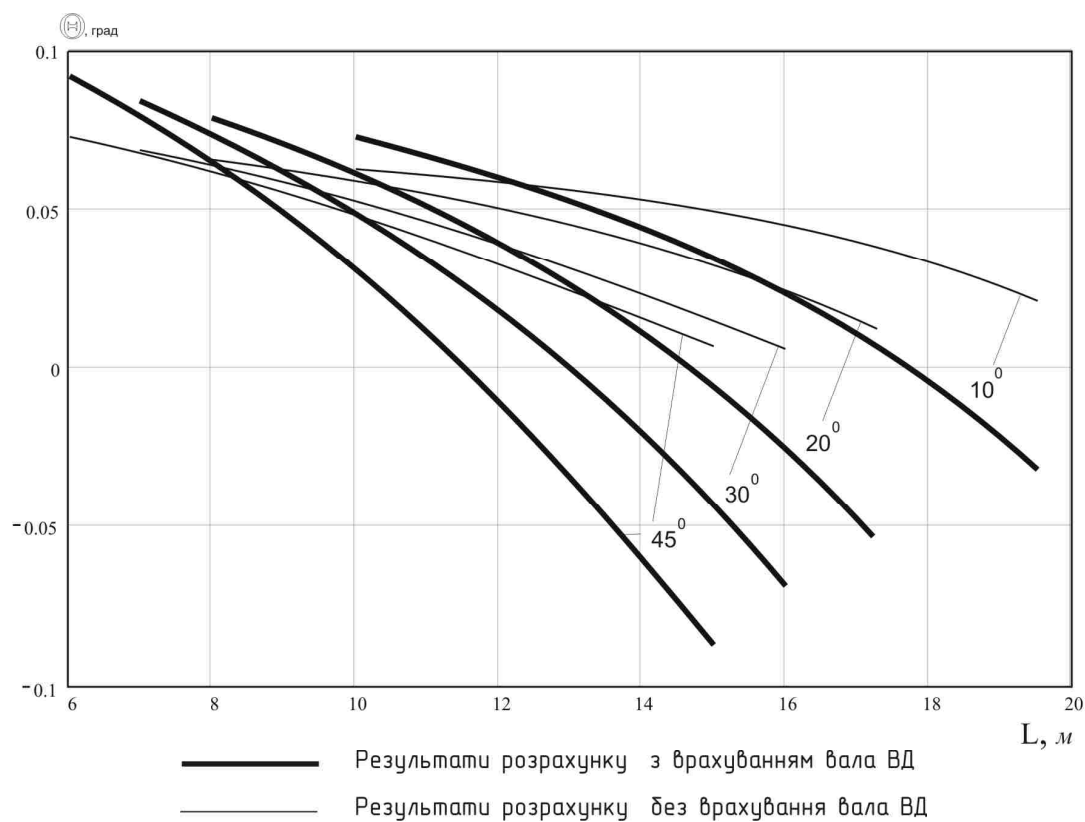


Рисунок 5 – Залежність зміни кута повороту долота від відстані між ОЦЕ для двоопорної неорієнтованої КНБК

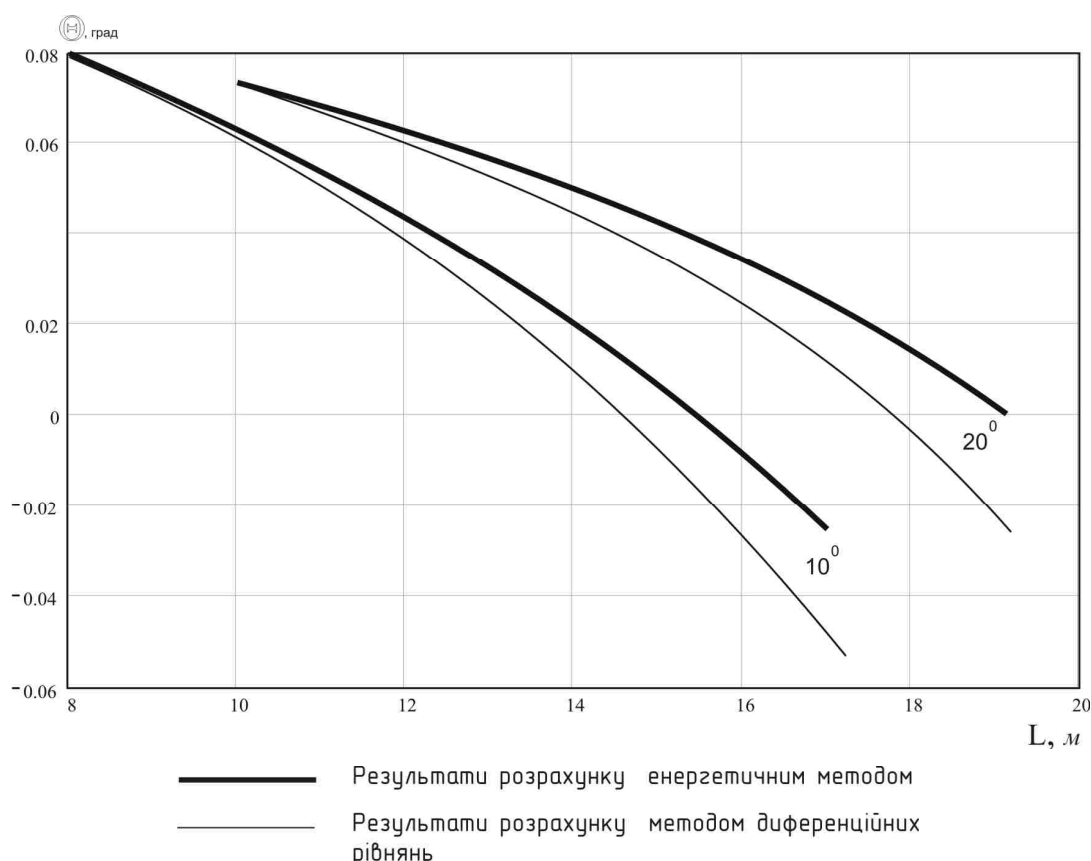


Рисунок 6 – Залежність зміни кута повороту долота від відстані між ОЦЕ для двоопорної неорієнтованої КНБК

схемі КНБК на кут повороту долота проведено теоретичні дослідження

На рис. 5 зображено залежність кута повороту долота для двоопорних конструкцій неорієнтованої КНБК за наявності в аналітичній моделі вала шпинделя вибійного двигуна і без нього. У результаті отримано, що наявність вала при розрахунку такої конструкції також спричинює значну зміну кута повороту долота Θ . При малих відстанях між першим і другим центраторами (до 8, 10, 11 і 12 м) відповідно при значеннях зенітного кута нахилу осі свердловини 45° , 30° , 20° , 10° різниця в значеннях Θ є незначною і не перевищує 8 %. Подальше збільшення віддалі між ОЦЕ зумовлює суттєве зростання різниці між значеннями Θ до величини 45 %. Як видно з графічної залежності (рис. 5), різниця в значеннях кутів повороту долота залежить і від зенітного кута нахилу стовбура свердловини. Чим більшою є величина зенітного кута, тим більша різниця між значеннями Θ . Це зумовлено тим, що зі збільшенням зенітного кута нахилу зростає вплив поперечної складової ваги ділянки КНБК між ОЦЕ, що обумовлює зміну статичної рівноваги як цілої конструкції, так і взаємодію долота із вибоєм свердловини.

При дослідженні зміни кута повороту долота, що при врахуванні в математичній моделі неорієнтованої КНБК з двома ОЦЕ вала шпинделя вибійного двигуна значення Θ (рис. 6), обчислені згідно з запропонованим у статті

підході і енергетичним методом [7], відрізняються між собою в середньому на 10 %.

Зі збільшенням відстані між центраторами різниця між значеннями зростає. Це свідчить про те, що при невеликих відстанях між опорами значення кутів повороту долота, визначені енергетичним методом, з достатньою точністю співпадають із значеннями, отриманими методом диференціальних рівнянь.

Висновки

1. За результатами аналітичних досліджень вдосконалено метод розрахунку неорієнтованих багатоелементних КНБК двома ОЦЕ шляхом деталізації її конструкції і її врахування в математичній моделі. З використанням даної методики підтверджено, що детальне врахування особливостей конструкції (ділянок малої довжини) впливає на статичні характеристики їх взаємодії із стінками свердловини, а саме: на відхиляючу силу на долоті, кут його повороту і сили притискування центральних елементів до стінок свердловини.

2. За результатами теоретичних досліджень встановлено, що:

а) наявність вала шпинделя вибійного двигуна в аналітичній схемі КНБК з двома ОЦЕ при незначній відстані між опорами (6 – 14 м) збільшує відхиляючу силу на долоті до 9 %. При подальшому збільшенні цієї віддалі за ра-

хунок зміни місця розташування верхнього ОЦЕ вплив вала шпинделя вибійного двигуна на Q зменшується до 2 %, що свідчить про нецільність врахування ділянок малої довжини при розрахунку КНБК із двома опорами;

б) реакція на нижньому ОЦЕ при врахуванні в складі неорієнтованої КНБК вала шпинделя вибійного двигуна є меншою від експериментальних даних на 5 %, а без вала – більшою на 9 %. На зміну сили взаємодії верхньої опори зі стінкою свердловини наявність вала вибійного двигуна не впливає і відрізняється від результатів експериментальних досліджень з допустимою величиною різниці 13 %;

в) для двоопорних конструкцій КНБК при малих віддальх між ОЦЕ (до 8, 10, 11 і 12 м відповідно за значеннь Zenітного кута нахилу осі свердловини 45^0 , 30^0 , 20^0 , 10^0) різниця між значеннями є незначною (не перевищує 8 %). Подальше збільшення віддалі між ОЦЕ зумовлює зростання різниці між значеннями θ (до величини 45 %).

Література

1 Гречин Е. Г. Разработка и исследование методов проектирования и работы неориентируемых компоновок низа буровой колонны: автореф. дис. на соиск. науч. ст. д-ра технических наук: спец. 25.00.15. “Технология бурения и освоения скважин” / Е. Г. Гречин. – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет. – Тюмень, 2009. – 47 с.

2 Григулецкий В. Г. Проектирование компоновок нижней части буровой колонны [Текст] / В. Г. Григулецкий, В. Т. Лукьянов. – М.: Недра, 1990. – 304 с.

3 Калинин А.Г. Бурение наклонных и горизонтальных скважин. / А. Г. Калинин, Б. А. Никитин, К. М. Солодкий, Б. З. Султанов – М.: Недра, 1997. – 651 с.

4 Султанов Б. З. Работа буровой колонны в скважине / Б. З. Султанов, Е. И. Ишемгузин, М. Х. Шаммасов, В. Н. Сорокин. – М.: Недра, 1973. – 217 с.

5 Івасів В. М. Розрахунок компоновок низу бурової колони (КНБК) з двома центраторами / В. М. Івасів, І. І. Чудик, А. В. Козлов, В. Г. Глушич // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2002. – № 2(3). – С. 15 – 16.

6 Експериментальні дослідження на моделях компоновок низу бурової колони / Крижанівський Є. І., Чудик І. І., Яворський М. М., Івасів В. М. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – № 4(9) – С. 121 – 123.

7 Метод визначення стійкості неорієнтованих КНБК з двома ОЦЕ / Івасів В. М., Чудик І. І., Артим В. І., Яворський М. М. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004. – № 2(11). – С. 20 – 24.

Стаття надійшла до редакційної колегії
06.09.13

Рекомендована до друку
професором **Коцкуlichem Я.С.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-ром техн. наук **Бондаренком М.О.**
(Інститут надтвердих матеріалів
ім. В.М.Бакуля НАН України, м. Київ)